Ultrarot-Photographie

mit 16 Abbildungen

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde
genehmigt von der Philosophischen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Berlin

Von

Hermann Willenberg
aus Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 28. 1. 1932

Tag der Promotion: 15. 2. 1932

1932
Verlag von Julius Springer, Berlin

219

Referenten: Professor Dr. Wehnelt
Professor Dr. Nernst

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Die von M. Czerny angegebene Methode einer Photographie für das ultrarote Spektralgebiet ist weiter entwickelt worden. Die eingestrahlte Energie wird benutzt zur Verdampfung einer Flüssigkeit (Öl), die sich in sehr dünner Schicht von lebhafter Interferenzfarbe auf einer ebenfalls sehr dünnen ultrarot absorbierenden Unterlage befindet (geschwärzte Zaponlackmembran). Bei einer Bestrahlung kann man dann äußerst geringe Dickenänderungen der Flüssigkeitsschicht an dem Umschlagen ihrer Interferenzfarbe gut erkennen und auch messen. Die Empfindlichkeit dieser Nachweismethode und die Zeichenschärfe des Verfahrens sind befriedigend. Andererseits lassen sich längere Expositionen vorläufig noch nicht durchführen. Es werden mehrere Spektralaufnahmen und einige Ultrarotabbildungen von Temperaturstrahlern gezeigt.

Vor längerer Zeit zeigte M. Czerny[1]), daß der Ultrarotphotographie mit sensibilisierten photographischen Platten eine Grenze prinzipieller Natur durch eine Art „Dunkelreaktion" gesetzt ist, und entwarf eine photographische Methode auf völlig anderer Grundlage mit gleichzeitiger Kompensation dieser Dunkelreaktion: Die Energie der nachzuweisenden Strahlung wurde benutzt zur Verdampfung einer mäßig flüchtigen Substanz, die sich in sehr dünner Schicht auf einer rückseitig mit Ruß geschwärzten dünnen Zaponlackmembran befand. Diese auf ein Glasrohr gespannte Membran befand sich in einem abgeschlossenen evakuierten Gefäß, das mit dem Dampf der flüchtigen Substanz gesättigt war und ein ultrarotdurchlässiges Fenster hatte. Die ersten Versuche wurden unter anderem mit Naphthalin gemacht und zeigten die Durchführbarkeit der Methode. Auch wurde in der genannten Arbeit schon darauf hingewiesen, daß das Verfahren in vieler Hinsicht ausbaufähig ist. Im folgenden sollen die in der Zwischenzeit erzielten Fortschritte mitgeteilt werden.

1. Zunächst einiges über die Auswahl der verdampfenden Substanz und die verschiedenen Möglichkeiten, an einer dünnen Substanzschicht geringere Dickenänderungen nachzuweisen.

Feste kristallisierende Stoffe lassen sich als feiner blinder Beschlag auf der Membran gut erkennen und sind in dieser Hinsicht sehr geeignet (so z. B. Naphthalin). Allerdings neigen derartige Schichten zur Umkristallisation. Die kleineren Kriställchen haben einen höheren Dampfdruck und sublimieren „auf die größeren hinauf". So wird die Schicht allmählich grobkörniger und dadurch für genauere Arbeiten ungeeignet.

[1]) M. Czerny, ZS. f. Phys. **53**, 1—12, 1929.

Diese Umkristallisation hat noch eine andere Wirkung: Wird ein Wärmestrahler auf eine besonders feinkörnige Schicht abgebildet, so werden die dadurch entstandenen Kontraste nach Unterbrechung der Bestrahlung noch weiter zunehmen, weil die Kriställchen in dem vorher bestrahlten Gebiet nun im Mittel kleiner sind als in dem unbestrahlten, also auch etwas höheren Dampfdruck haben. Dieser Vorgang wurde an feinkörnigen Naphthalinschichten tatsächlich beobachtet und stellt im Prinzip einen typischen Entwicklungsprozeß dar. Seine Auswertung erscheint auf den ersten Blick recht verlockend, wurde aber praktisch nicht versucht, weil ja gleichzeitig die gesamte Schicht ungleichmäßiger wird. Eine anfänglich so feinkörnige Kristallschicht, welche sehr kleine systematische Kontraste nachträglich verstärkt, wird natürlich zufällige Kontraste ebenso verstärken, so daß eine absolute Verbesserung des Bildes durch den Entwicklungsprozeß hier gar nicht erreicht werden kann. Der Vorteil bei den photographischen Entwicklungsprozessen besteht eben darin, daß normalerweise außer dem latenten Bild keine „zufälligen Eindrücke" (Schleier) vorhanden sind.

Da also diese blinden Kristallpulverschichten nur zu gröberen Arbeiten verwendbar sind, erscheinen zusammenhängende klare Kristallschichten oder glasige Beschläge geeigneter. Hier wären gleichzeitig weit empfindlichere optische Nachweismethoden anwendbar. Es wurde beispielsweise versucht, die Zaponlackmembran durch Vakuumsublimation mit einer klaren Naphthalinschicht zu versehen. Der Naphthalindampf schlug sich aber nur an den Kammerwänden nieder. Wahrscheinlich müßte die Membran während der Vakuumbedampfung energisch gekühlt werden, was technisch schwierig ist.

Da also diese und ähnliche Versuche mit festen Stoffen fehlschlugen, kamen weiterhin hauptsächlich *Flüssigkeiten* in Betracht. Auch hier arbeitet man zweckmäßig mit Vakuumbedampfung. Allgemein wären bei Flüssigkeiten zwei Gruppen zu unterscheiden: Die einen bilden auf der Membran einen blinden Beschlag aus sehr feinen Tröpfchen, der sich genau wie ein Kristallpulverbeschlag verhält. Die anderen adhärieren vollkommen an der Unterlage und bilden eine zusammenhängende Schicht mit ebener Oberfläche. (Bei den hier erforderlichen Schichtdicken von einigen Zehntel μ genügt erfahrungsgemäß die innere Reibung, um ein störendes Fließen der Schicht zu verhindern; siehe unten.) Hier lassen sich geringe Dickenänderungen optisch gut nachweisen: Entweder die Unterlage hat eine blinde Oberfläche infolge mikroskopisch kleiner Unebenheiten; dann werden letztere durch die Flüssigkeit ausgefüllt, und die Oberfläche wird klar.

An bestrahlten Stellen wird sie wieder blind. Dieser Nachweis ist sehr empfindlich. Infolge der Rauhigkeit der Unterlage dürfte allerdings der Dampfdruck der Flüssigkeitsschicht von der Schichtdicke abhängen (veränderliche Krümmung der Oberflächenelemente), so daß das Gleichgewicht der Flüssigkeit mit ihrem Dampf nicht völlig indifferent ist.

Ist aber die Unterlage klar, so lassen sich auf ihr die dünnen Flüssigkeitsschichten und deren geringe Dickenänderungen gut an den auftretenden *Interferenzfarben*[1]) erkennen und auch messen. Dies ist der bisher hauptsächlich untersuchte und wohl auch aussichtsreichste Fall. Ist der Brechungsindex der benutzten Flüssigkeit nicht allzu verschieden von dem der Unterlage, so können beide Schichten als optisch einheitliches Blättchen angesehen werden. Man beobachtet dann im reflektierten Licht die Farben, welche entstehen durch Interferenz der an der Vorderseite der Flüssigkeitsschicht f (Fig. 1) reflektierten Welle mit der an der Rückseite der Membran m reflektierten Welle (r ist die ultrarot absorbierende Rußschicht).

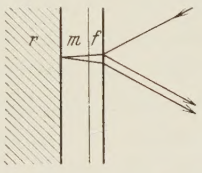


Fig. 1.
Strahlengang bei der Entstehung von Interferenzfarben an dünnen Zaponlackmembranen.

Um kräftige Interferenzfarben zu erhalten, wird man nach Möglichkeit starkbrechende Substanzen wählen und vor allem Interferenzen niedrigster (erster bis dritter) Ordnung erzeugen, da ja mit steigender Ordnungszahl der Weißgehalt der Interferenzfarben stark zunimmt. Man muß also dafür sorgen, daß der Gangunterschied g der beiden interferierenden Wellen möglichst $< 3\,\lambda$ bleibt (λ = mittlere Wellenlänge des Beobachtungslichtes, also $\lambda \sim 0{,}6\,\mu$).

Der Lichtweg w durch die Schicht $(m + f)$, vermehrt um $\lambda/2$ (den Phasensprung der an der Vorderseite von f reflektierten Welle), soll also möglichst kleiner als $3\,\lambda$ sein. Der Ausdruck für den *einfachen* Lichtweg $w/2$ durch ein dünnes Blättchen von der Dicke $(m + f)$ lautet:

$$\frac{w}{2} = (m + f) \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha},$$

n = Brechungsindex der Substanzen $\sim 1{,}5$, α = Einfallswinkel. Man erhält also die Bedingung:

$$g = w + \frac{\lambda}{2} = 2\,(m + f) \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2} < 3\,\lambda,$$

oder für senkrechten Einfall:

$$m + f < \frac{5\,\lambda}{4\,n} = \frac{3\,\mu}{4\,n} = \underline{0{,}5\,\mu}.$$

[1]) Intensive Farbstoffe von genügender Flüchtigkeit dürfte es kaum geben.

Diese Bedingung läßt sich praktisch ohne weiteres erfüllen, da bereits Zaponlackmembranen von 0,05 μ Dicke genügende Festigkeit haben.

Es ist ein günstiger Umstand, daß in der Farbenskale dünner Blättchen einige Farben ganz besonders leicht umschlagen: Hat die Dicke $m + f$ beispielsweise den Wert $\frac{0{,}564}{n}\,\mu$ oder $\frac{0{,}287}{n}\,\mu$, so empfindet das Auge schon bei äußerst geringen Dickenänderungen (0,01 bis 0,005 μ!) deutliche Farbkontraste, wie ein Ausschnitt aus der Farbtabelle für dünne Luftschichten (z. B. Kohlrausch, Lehrbuch d. prakt. Phys., *ältere* Auflagen) zeigt[1]):

Dicke in μ ($n = 1$)	Farbe
0,275	Tief Rot
0,282	Purpur
0,287	Violett
0,294	Indigo
⋮	⋮
0,550	Dunkel Violett-Rot
0,564	Violett
0,575	Indigo

Diese Stellen sind also günstige „Arbeitspunkte"; allerdings hauptsächlich nur für visuelle Beobachtung. Vor Beginn einer Bestrahlung bedampft man also die Membran solange mit der Flüssigkeit, bis eine solche kritische Schichtdicke $m + f$ erreicht ist.

Mit Hilfe dieser besonders leicht umschlagenden Interferenzfarben gelang übrigens auch die Beobachtung adsorbierter Schichten: Einige Flüssigkeiten schlagen sich in extrem dünner Schicht von selbst aus der Dampfphase auf den Membranen nieder. Dies kann aber nur bemerkt werden, wenn die Membran, wenigstens an einigen Stellen, eine solche kritische Farbe hat. Eine ganz rohe Abschätzung der dort beobachteten Farbumschläge ergab dann für diese Flüssigkeitsschichten eine Dicke von ungefähr 0,001 bis 0,006 μ, also auf jeder Membranseite (es wurde hier natürlich mit unberußten Membranen gearbeitet) etwa 5 bis 30 Å. Das sind also adsorbierte Schichten mit stark erniedrigtem Dampfdruck.

Für die Zwecke der Ultrarotphotographie ist es erforderlich, daß die Flüssigkeit möglichst wenig auf der Unterlage fließt, so daß Schichtdickenunterschiede sich nicht merklich ausgleichen.

[1]) In Übereinstimmung hiermit steht die Erfahrung, daß diese kritischen Farbtöne auf den Membranen im Durchschnitt wesentlich kleinere Flächen einnehmen als die anderen Farben.

Die Geschwindigkeit $\bar{v}$, mit der eine Flüssigkeitsschicht von der Dicke $\sim 0{,}1\ \mu$ an einer senkrechten Membran abwärtsfließt, infolge ihres Eigengewichtes, ist sehr klein. Selbst in einem ungünstigen Falle mit sehr geringer Zähigkeit η, wie z. B. Petroleum ($\eta = 0{,}02$ CGS), ergibt die Rechnung nur $\bar{v} = 1{,}3 \cdot 10^{-6}$ cm/sec.. Diese geringe Beweglichkeit bedeutet keine Störung. Anderenfalls könnte man mit horizontaler Membran arbeiten.

Unangenehm ist unter Umständen die Nivellierung vorhandener Schichtdickenunterschiede durch die Oberflächenspannung, wie folgendes Beispiel zeigt: Strahlt man etwa ein Spektrum von nahe benachbarten, annähernd äquidistanten Linien ein (z. B. eine Rotationsschwingungsbande), so wird nach einiger Zeit die Dicke h der Flüssigkeitsschicht längs der Frequenzskale (x-Richtung) annähernd sinusförmig zwischen dem maximalen Anfangswert $h = \bar{h} + A$ und einem kleinsten Wert $h = \bar{h} - A$ schwanken ($\bar{h}$ ist dann die mittlere Schichtdicke, A die Amplitude der Schwankung). Nach der Bestrahlung werden aber die so erzeugten Oberflächenkrümmungen allmählich wieder ausgeglichen durch den kapillaren Krümmungsdruck $p = -\alpha/\varrho$ (α = Kapillaritätskonstante, ϱ = Krümmungsradius der Oberfläche). Die Amplitude A nimmt also mit der Zeit ab. Dieser Ausgleichvorgang läßt sich rechnerisch behandeln: Mit p kennt man auch das Druckgefälle $-\partial p/\partial x$; daraus ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit der Substanz, und aus dieser die Nivellierungsgeschwindigkeit $-dA/dt$. Die Durchrechnung ergibt:

$$A = f(t) = A_0 \cdot e^{-\frac{\pi^4 \alpha \bar{h}^3}{3 \eta l^4} \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\beta t},$$

also eine „Halbwertszeit"

$$\tau = \frac{\ln 2}{\beta} = \frac{\ln 2 \cdot 3 \eta l^4}{\pi^4 \alpha \bar{h}^3} \text{ sec}$$

(l ist die Wellenlänge der sin-Kurve).

Als Zahlenbeispiel wähle ich den Grenzkohlenwasserstoff Tridekan, $C_{13}H_{28}$, der aus verschiedenen weiter unten angeführten Gründen als Arbeitssubstanz sehr geeignet wäre. Es ist dann ungefähr:

$$\eta = 0{,}02 \text{ cm}^{-1} \text{ g sec}^{-1},$$

$$\alpha = 26 \text{ g sec}^{-2},$$

ferner sei

$$l = 0{,}1 \text{ mm} = 10^{-2} \text{ cm (vgl. S. 674)},$$

$$\bar{h} = 0{,}05 \text{ mm} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ cm},$$

dann wird also

$$\tau = \frac{0{,}694 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-8}}{97 \cdot 26 \cdot 1{,}25 \cdot 10^{-16}} \text{sec} = 1{,}38 \cdot 10^{3} \text{ sec}.$$

In $\tau = 23$ min wird also eine sinusförmig gewellte Flüssigkeitsoberfläche der hier angenommenen Art durch den Krümmungsdruck zur Hälfte eingeebnet. Dieser Effekt ist also bei der Aufnahme von linienreichen Spektren unter Umständen von sehr erheblichem Einfluß. Er muß daher bei der Wahl der Dispersion und der Spaltbreiten berücksichtigt werden (Näheres weiter unten). Die Dispersion entspricht dem Faktor l ($2\,l$ = Abstand zweier „Linien"), geht also mit der vierten Potenz ein! Fast ebenso stark geht die mittlere Schichtdicke $\bar{h}$ ein. Man wird sie möglichst niedrig halten. Der Wert α/η schwankt sehr stark und ist im allgemeinen erheblich günstiger als in dem hier gewählten Beispiel. Für Glycerin erhält man z. B. $\frac{\alpha}{\eta} = \frac{66}{10{,}7}$ und so $\tau = 77$ std.

Neben diesen speziell bei Flüssigkeiten auftretenden Störungen sind weiterhin noch andere zu erwarten. So hat bei vertikal stehender Membran die barometrische Abnahme des Dampfdruckes mit der Höhe schon einen Einfluß: Sie bewirkt eine langsame Änderung Δh der Schichtdicke h in Abhängigkeit von der Höhenlage; und zwar errechnet sich bei einem Dampfdruck von $\sim 0{,}05$ mm Hg eine Änderung

$$\Delta h = 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm pro cm Höhendifferenz und sec.}$$

Das bedeutet bei Beobachtung mit Na-Licht einen kräftigen Kontrast nach etwa 3 Minuten. Bei den bisher wirklich benutzten Petroleumfraktionen ist der gleiche Effekt nach frühestens etwa 15 Minuten zu erwarten und wäre nach dieser Zeit nicht mehr genau meßbar.

Die Abnahme ließe sich übrigens immer ausreichend kompensieren durch etwas ungleichmäßige Bedampfung bzw. durch wagerechte Lagerung der Membran und entsprechende Knickung des Strahlenganges.

Untersuchungen über rein statistische Schwankungen der Schichtdicke stehen noch aus.

Die meisten leicht erreichbaren und auch sonst geeigneten Flüssigkeiten sind von beschränkter chemischer Reinheit oder gar komplizierte Gemische. Es entstehen dann folgende Schwierigkeiten: Beim Herstellen einer dünnen Schicht (z. B. aus Petroleum oder Leichtöl) durch Aufdampfen im Vakuum werden vorwiegend die flüchtigeren Bestandteile des Gemisches aus dem erwärmten Vorratsbehälter verdampfen. Die so entstehende dünne Schicht hat also einen etwas höheren Dampfdruck als der Vorrat und wird daher

langsam wieder zurückdestillieren, d. h. die Schicht hat nur eine beschränkte Lebensdauer. Dieser Unterschied im Dampfdruck läßt sich zwar durch mehrfaches Nachdampfen etwas herabsetzen, indem sich dann allmählich auf der Membran die schwerer flüchtigen Bestandteile des Gemisches anreichern; aber trotzdem bedeutete die beschränkte Lebensdauer bei den bisherigen experimentellen Arbeiten eins der unangenehmsten Hindernisse. Es lag nun nahe, den Dampfdruck der Schicht irgendwie zu erniedrigen, so daß er gleich dem des Vorrats wird. Das läßt sich beispielsweise dadurch erreichen, daß man vorher auf die Zaponlackmembran eine äußerst geringe Menge sehr schwer flüchtigen Öles bringt. Eine so vorbereitete Membran braucht nachher in der Kammer gar nicht bedampft zu werden; denn es schlägt sich aus dem Dampf des in der Kammer befindlichen eigentlichen Ölvorrats von selbst eine Schicht auf der Membran nieder: Der Dampf löst sich heftig in dem schwer flüchtigen „Impfstoff", bis eine Gleichgewichtskonzentration erreicht ist. Derartige Schichten halten sich nun in der Tat nahezu beliebig lange, sind aber auch recht unempfindlich. Ferner zeigen die mit ihnen hergestellten Aufnahmen eine unnatürliche Verstärkung der Körperkanten. Fig. 2 ist hergestellt als „Ultrarot-Schattenbild" des in Fig. 16 wiedergegebenen kleinen schwalbenschwanzförmig ausgeschnittenen Blechstreifens. Fig. 2 vermittelt aber nicht den Eindruck einer solchen *Fläche* als Schattenwerfer, sondern den einer schattenwerfenden *Drahtfigur* gleicher Gestalt. (Der in das Bildfeld hineinragende Stab gehört zur Apparatur.)

Fig. 2. Ultrarot-Schattenbild von einem schwalbenschwanzförmigen Blechstreifen (vgl. Fig. 16), aufgenommen mit einer Ölschicht, die durch „Impfung" der Membran mit Schweröl erzeugt wurde.

Außerdem zeigen alle Gemische noch einen weiteren Nachteil. Unter der Voraussetzung, daß die Gesetze über den Dampfdruck von Gemischen in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis auch bei so kleinen Mengen volle Gültigkeit besitzen, ist folgendes zu erwarten.

Angenommen, es sei gelungen, aus dem Vorratsgemisch eine dünne Schicht zu erzeugen von genau derselben prozentualen Zusammensetzung wie der Vorrat. Ihre Menge sei klein gegenüber der Vorratsmenge. Dann hat diese Schicht zwar keine beschränkte Lebensdauer mehr, denn ihr Dampfdruck ist der gleiche wie der des Vorrats. Aber dieser Gleichgewichtszustand der Schicht mit dem Dampf ist kein völlig indifferenter wie bei chemisch einheitlichen Substanzen, sondern der Dampfdruck ändert sich mit der Schichtdicke, also speziell während einer Ultrarotbestrahlung: er

sinkt an den bestrahlten Stellen infolge vorwiegender Verdampfung der flüchtigeren Komponenten. Das bewirkt (außer einem ständig sinkenden Nutzeffekt; s. unten) nach Unterbrechung der Bestrahlung dort eine vermehrte Kondensation, bis das Gleichgewicht mit dem darüber befindlichen Dampf wieder hergestellt ist. So geht die mit der Bestrahlung erzielte Schichtdickenänderung zum großen Teil wieder verloren.

Andererseits könnte man mit passend zusammengesetzten derartigen Gemischen große Intensitätsunterschiede erfassen, da ja an den stark bestrahlten Stellen der Wirkungsgrad des Prozesses infolge lokaler Dampfdruckerniedrigung bald erheblich sinkt und schließlich überhaupt nichts mehr verdampft. Derartige Gemische würden also „weich" arbeiten.

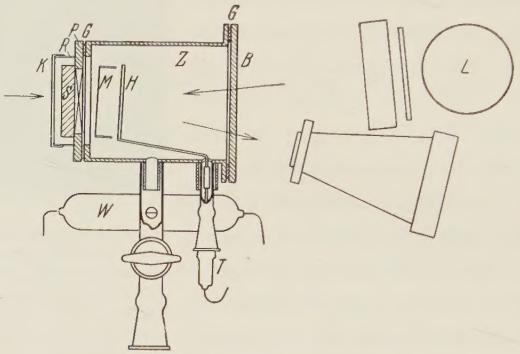


Fig. 3. Die Bestrahlungskammer.

2. *Die Versuche.* Als Vakuumgefäße wurden hauptsächlich Metallkammern mit abnehmbaren Stirnfenstern benutzt. Fig. 3 zeigt ein solches Gefäß in der Aufsicht (Schnitt).

Der Messingzylinder Z wird links verschlossen durch eine runde Metallplatte P mit quadratischem Fensterausschnitt, auf den ein NaCl-Fenster S ($50 \times 50{,}9\ \text{mm}^2$) aufgekittet ist. R ist ein Ring, der eine Schutzkappe K trägt. Die rechte Stirnseite des Messingzylinders wird abgeschlossen durch ein Beobachtungsfenster B aus Glas. G sind Gummidichtungen. Zur Pumpe führt ein Ansatz mit Absperrhahn und Widerstandsmanometer W. Zum Evakuieren der Anordnung diente eine zweistufige Hg-Pumpe. Das erforderliche Vakuum von $^1/_{100}$ bis $^1/_{20}$ mm Hg hielt sich trotz der einfachen Gummidichtungen sehr gut. Die zu bestrahlende Membran M ist auf einem Messingring (Durchmesser 40 mm) aufgezogen, der auf einem nicht gezeichneten kleinen Gestell verschraubt wird. Der Ring beschlägt, wie alle übrigen metallischen Oberflächen, beim Arbeiten sehr stark mit Öl. Man darf daher die Membran nie ganz bis zum Rande berußen, da sonst von dem Ring her ständig Öl kapillar in die Rußschicht eindringt, wodurch sie unbrauchbar wird. Die Dicke der Rußschicht wurde im allgemeinen so bemessen, daß sie praktisch undurchsichtig war. Nur hell leuchtende

Körper, wie etwa die Wendel einer Glühlampe, waren gut sichtbar. Gegenüber der Membran befindet sich eine bewegliche kleine Heizspirale H, die mit der zu benutzenden Flüssigkeit getränkt ist. Letztere wird durch mäßiges Heizen der Spirale auf die Membran aufgedampft[1]). Dann wird die Spirale durch ihren drehbaren Träger T beiseite gedreht, so daß man durch B hindurch die ganze Membran während der Bestrahlungen betrachten und auch photographieren kann. Diese photographischen Aufnahmen wurden mit einer gewöhnlichen photographischen Kamera hergestellt unter Verwendung geeigneter Platten- und Farbfilterkombinationen (Farbfilter: Schottsches Farbglas GG 11, 2 mm oder BG 3, 1 mm. Aufnahmematerial: Agfa-Kontrastplatten und Perutz-Silbereosinplatten). Als Beleuchtung diente eine 200 Watt-Lampe L, deren Wärmestrahlung durch eine Küvette mit Wasser und ein Schottglas BG 9, 3 mm, zurückgehalten wurde. Um das bereits an B teilweise reflektierte Beobachtungslicht möglichst nicht in die Kamera zu leiten, mußte die Membran M etwas gegen die Ebene von B geneigt werden. Wenn die photographische Aufnahme der bestrahlten Membran erledigt ist, braucht man nur die Ölreste fortzudampfen durch eine allgemeine kurze Bestrahlung, z. B. mit einer Glühlampe. Danach kann man dann gleich mit einer neuen Bedampfung und Exposition beginnen, ohne daß zwischendurch Luft eingelassen zu werden braucht. So kann man oft einen ganzen Tag über mit demselben Vakuum arbeiten. Mit einer sorgfältig hergestellten Membran lassen sich sehr viele Expositionen machen, ehe sie verdirbt (durch Verölen der Rußschicht usw.).

Die Auswahl einer geeigneten Flüssigkeit zur Erzeugung der Schicht war schwierig; denn es sind mehrere Anforderungen zugleich zu erfüllen: Die Substanz soll chemisch einheitlich sein aus den oben erwähnten Gründen; ferner möglichst indifferent, damit sie weder die Zaponlackmembran[2])

[1]) Man kann auch ohne jede Heizeinrichtung die Membran mit einer Flüssigkeitsschicht versehen: Man kühlt sie vorübergehend sehr gleichmäßig ab, indem man sie in Strahlungsaustausch mit einem kalten Körper bringt (flüssige Luft oder festes CO_2). Einige Vorversuche in dieser Richtung sprechen für die Brauchbarkeit der Methode.

[2]) Einige Versuche, die Zaponlackmembran durch anderes Material zu ersetzen oder sie durch einen dünnen Quarzüberzug (vgl. H. C. Burger u. P. H. van Cittert, ZS. f. Phys. **66**, 218, 1930) vor chemischen Einwirkungen zu schützen, führten bisher noch zu keinem Erfolg.

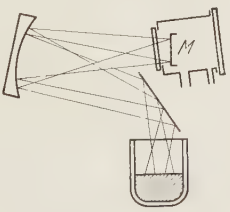


Fig. 4.
Kühlung der Membran M (zur Schichterzeugung) durch Abstrahlung in ein Gefäß mit flüssiger Luft.

noch irgendwelche anderen Teile der Apparatur angreift (Metallteile, Dichtungen, Kittstellen, NaCl-Fenster).

Überdies kommen für feinere Aufnahmen nur solche Stoffe in Frage, die zusammenhängende Schichten mit Interferenzfarben bilden, die also die Unterlage vollkommen benetzen. Leider konnte trotz sehr zahlreicher Proben bisher keine Substanz gefunden werden, die alle diese Anforderungen gleichzeitig ohne Einschränkung erfüllt und außerdem noch den geeigneten Dampfdruck in der Größenordnung von $^1/_{100}$ mm Hg aufweist. [Hier nur einige ganz wenige Beispiele: Glycerin (zu kleiner Dampfdruck), Dekalin (zu großer Dampfdruck), α-Bromnaphthalin (keine zusammenhängende Schicht), Äthylen-Glykol (geringe Quellung der Membran). Benzoesäure-Äthylester (zerstört die Membran) usw.]

Daher mußte vorläufig mindestens eine der genannten Anforderungen zurückgestellt werden: Alle bisherigen Ultrarotaufnahmen mit Flüssigkeiten wurden durchgeführt mit *Gemischen*; und zwar wurden besonders hergestellte[1]) enge Petroleumfraktionen benutzt, also Gemische aus zahlreichen Gliedern der Reihe C_nH_{2n+2}, und zwar wurde hauptsächlich eine Fraktion benutzt, deren Siedegrenzen angegeben waren mit 260 bis 280° C bei 1 Atm.

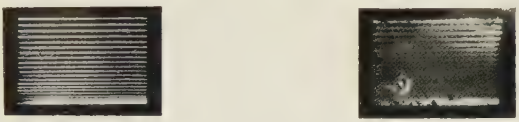
Diese Fraktionen hatten also die oben bereits geschilderten Nachteile eines Gemisches und außerdem noch einige weitere: Die beim Arbeiten ständig frei werdenden flüchtigsten Bestandteile beteiligen sich nicht an dem Prozeß auf der Membran, erhöhen aber den Druck in der Kammer bald so sehr, daß dadurch die Diffusionsgeschwindigkeit auch der anderen Moleküle außerordentlich stark verringert wird (sehr unerwünschte „Desensibilisierung"). Es mußte daher ein Ausfriertäschchen angebracht werden: Eine dritte Bohrung des Absperrhahnkükens führte abwärts zu einem kleinen Blindsack (Durchmesser ~ 0,8 cm. Länge 10 cm), der mit flüssiger Luft gekühlt wurde. Die Wirkung konnte durch die Hahnstellung abgestuft werden. Die Maßnahme an sich bedeutet leider eine weitere erhebliche Entfernung von dem idealen Gleichgewichtszustand, wie er erstrebt ist und wie er z. B. ursprünglich bei der Verwendung von Naphthalin auch nahezu erreicht war.

Immerhin ließen sich trotz dieser Nachteile schon mit derartigen Gemischen — im folgenden kurz als Öle bezeichnet — gute Fortschritte erzielen. Die Empfindlichkeit beträgt etwa das 50fache von der der Naphthalinschichten: Eine in 2 m Entfernung aufgestellte Hefnerkerze bewirkt

[1]) Laboratorium Dr. Fränkel u. Dr. Landau, Berlin-Oberschöneweide.

in etwa 2 Minuten einen deutlichen Farbumschlag, der rechnerisch bei Annahme völliger Verlustfreiheit nach etwa $1^1/_4$ Minuten zu erwarten ist. Hierzu ist allerdings einschränkend zu bemerken, daß z. B. $^1/_2$ HK in derselben Entfernung den gleichen Farbumschlag in 4 Minuten noch nicht bewirkt, sondern erst nach merklich längerer Zeit. Es ist zu vermuten, daß dies ganz sekundäre Ursachen hat und durch Verwendung chemisch einheitlicher Substanzen und bester Membranen vermieden werden kann. Vorläufig allerdings bleibt hierdurch der Wert langer Expositionszeiten noch illusorisch.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die erreichbare Zeichenschärfe. Es war zu befürchten, daß die in der absorbierenden Rußschicht[1]) entstehende Wärme durch Querleitung zunächst stark verteilt werden würde, ehe sie zur Verdampfung verbraucht wird. Denn die meiste Wärme entsteht ja in den der Membran entfernteren Teilen der Rußschicht, auf der Seite, wo die Strahlung auffällt.



a Fig. 5. b

Strichraster zur Feststellung der erreichbaren Zeichenschärfe;
a) normale Photographie, 2,7-fach lineare Vergrößerung,
b) Ultrarotaufnahme 1 : 1, *nachträglich* für die Reproduktion 2,7-fach vergrößert.

Der größte Teil der entstehenden Wärme muß also erst fast die ganze Rußschicht durchströmen, ehe er die Membran mit der verdampfenden Schicht erreicht. Gerade während dieser Strömung fließt natürlich viel Wärme auch zur Seite. Für feinere Arbeiten dürfte es sich also unter Umständen empfehlen, daß man ruhig auf gute Energieausbeute verzichtet und mit einer dünnen Rußschicht arbeitet, die beispielsweise nur 50 % absorbiert, statt mit einer doppelt so dicken Schicht, die auch nur 25 % mehr absorbiert, aber sehr viel stärker querleitet. Sehr wünschenswert ist ein möglichst hoher Wert der Absorptionskonstanten γ. $\gamma_{\text{Ruß}}$ sinkt nach längeren Wellen erheblich, so daß schon im mittleren Ultrarot bald andere Absorbenzien vorzuziehen sind. Um nun die Querleitung genauer beurteilen zu können, wurde mit einer Teilmaschine auf einer versilberten Glasplatte ein System von 21 Strichen hergestellt. Die einzelnen Striche hatten eine Breite von $^1/_{10}$ mm; die 20 Zwischenräume betrugen $^{20}/_{100}$, $^{19}/_{100}$, $^{18}/_{100}$ ... $^1/_{100}$ mm (Fig. 5a, etwa das 2,7fache der natürlichen

[1]) Systematische Untersuchungen mit anderen Absorptionsmitteln, wie z. B. Wismut-Schwarz oder Silber-Gelatineemulsion, stehen noch aus.

Größe. Die letzten drei Striche waren nicht mehr getrennt). Das ganze System war also $21 \cdot {}^{1}/_{10} + \frac{20}{2} \cdot ({}^{1}/_{100} + {}^{20}/_{100}) = 2{,}1 + 2{,}1 = 4{,}2$ mm breit. Von diesem Gegenstand wurden Ultrarotphotographien im Maßstab 1 : 1 hergestellt, von denen eine in Fig. 5b wiedergegeben ist, ebenfalls *etwa 2,7fach vergrößert*. Man kann dort noch die Zwischenräume bis etwa ${}^{9}/_{100}$ mm Breite gut erkennen. Die Ultrarotmembranen zeichnen also etwa so, wie Photoplatten mit einer Korngröße von $\sim {}^{1}/_{20}$ mm $= 50\ \mu$ zeichnen würden. Im Bedarfsfalle könnte man durch sehr vollkommene Justierung und Verwendung möglichst dünner Rußschichten sicher noch weiterkommen.

Die hier erreichte Zeichenschärfe ist aber für viele ultrarote Spektralaufnahmen schon ausreichend. Ferner bleibt immer noch der Ausweg, die Spaltbreite und die Dispersion gleichmäßig um einen geeigneten Betrag zu vergrößern; dann bleibt die erforderliche Bestrahlungszeit ungeändert, und man erhält ein entsprechend breiteres Spektrum, welches dem ursprünglichen schmaleren optisch genau gleichwertig ist. Nur die *Registrierung* auf der Membran verläuft jetzt günstiger, „relativ schärfer". [Neben der Wärmequerleitung im Ruß sinkt dann zugleich auch die Querströmung in der Flüssigkeitsschicht sehr stark ab, und zwar bei doppelter Dispersion auf ${}^{1}/_{16}$ (vgl. S. 668).] Bei der zurzeit erreichten Zeichenschärfe muß man also beispielsweise die Dispersion stets so groß wählen, daß bei einer Spaltbreite von $\sim {}^{1}/_{10}$ mm alle gewünschten Einzelheiten im Spektrum vorhanden sind.

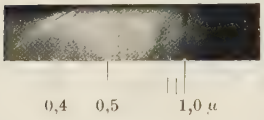


Fig. 6.
Emissionslinien einer Hg-Bogenlampe, Spalt 0,4 mm.

Es wurden nun einige praktische Anwendungen der Ultrarotphotographie gemacht zur Erprobung ihrer gegenwärtigen Leistungsfähigkeit an einigen charakteristischen Beispielen. Zunächst wurde eine Aufzeichnung des Spektrums einer Hg-Bogenlampe versucht. Fig. 6 zeigt eine derartige Aufnahme von 4358 Å bis ins Ultrarot nach einer Exposition von etwa 2 Minuten bei sehr breitem Spalt (0,4 mm) mit einem 60°-Quarzprisma von 5×5 cm² Seitenfläche. Zu dieser Aufnahme diente, wie zu allen folgenden, ein Spiegelspektrometer von Schmidt & Haensch (Durchmesser und Brennweite der Spiegel 4,9 und 34 cm). Man erkennt fünf Linien bzw. Liniengruppen:

4358, 5461, 5791, 10139, 11290.

Das Spektrum ist blaß und unscharf, da die Ölschicht während der Bestrahlung langsam etwas uneben (fleckig) wurde und dann keine einheitliche

Interferenzfarbe zeigte. Diese Störung ist bisher sehr häufig und dürfte ihre Ursache in kleinen Unebenheiten der Zaponlackoberfläche haben, die sich durch Ändern der Lackmischung wahrscheinlich noch vermeiden lassen werden; vorläufig sind sie sehr störend. (Auf anderen Unterlagen, wie z. B. Glas, bleiben die Ölschichten vollständig klar.)

Es ist noch darauf hinzuweisen, daß die Kontraste auf der Photoplatte — bei der oben geschilderten einfachen Belichtungsmethode — natürlich nur ein sehr unvollkommener Maßstab sind für die auf der Ölschicht tatsächlich entstandenen Dickenunterschiede und damit auch für die Intensität der einzelnen Spektrallinien. Derartige Intensitätsmessungen ließen sich aber mit monochromatischer Beleuchtung sehr wohl durchführen: Man dampft gerade soviel Öl auf die Membran, daß sich für die Beobachtungsfrequenz minimale Reflexion ergibt. Ein eingestrahltes Spektrum erscheint dann hell auf dunklem Grunde, und zwar ist die Helligkeit ein eindeutiges (wenn auch nicht lineares) Maß für die Intensität der einzelnen Linien, solange an der Stelle der stärksten Linie nicht die maximale Reflexion überschritten wird.

Selbstverständlich kann man ganz entsprechend dasselbe Spektrum auch dunkel auf hellem Grunde entstehen lassen, indem man die Membran vor der Exposition so bedampft, daß sie gerade *maximale* Reflexion zeigt. So war es z. B. bei der Hg-Aufnahme geschehen. Es hat also bei dieser Interferenzfarbenmethode gar keinen Wert, zwischen Negativen und Positiven zu unterscheiden.

In der Absicht, nun die bekannte Rotationsschwingungsbande von HCl bei 3,46 μ zu photographieren, wurde ein kleines zylindrisches Absorptionsrohr von 10 cm Länge und 4 cm Durchmesser, das an den Stirnflächen durch Glimmerplatten verschlossen war, mit HCl-Gas von 1 Atm. gefüllt. Als Strahler diente, wie bei allen folgenden Spektralaufnahmen, ein Nernstbrenner. Es zeigte sich sofort, daß das ganze Spektrum schwach kanneliert war durch Interferenzminima der etwas zu dünnen Glimmerplatten (vgl. Schaefer-Matossi, Das ultrarote Spektrum, S. 143). Eine derartige Störung, die auf einer Photographie auf den ersten Blick erkannt wird, kann bei punktweiser Ausmessung des Spektrums erst viel später festgestellt werden oder gar schwere Täuschungen hervorrufen. Der Glimmerverschluß wurde durch dickere Quarzplatten ersetzt und dann die HCl-Bande aufgenommen: Fig. 7 ist mit einer fehlerhaften Membran hergestellt. Man erkennt aber neben einigen H_2O- und C_2O-Banden mehrere Linien (hell auf dunklem Grunde) der HCl-Rotationsschwingungsbande bei 3,46 μ, deren Mitte an der ausfallenden Nullinie deutlich zu erkennen ist. Fig. 8

zeigt eine andere klarere Aufnahme der HCl-Bande allein, nachträglich schwach vergrößert. (Dispersion in beiden Fällen: Ein 60°-Quarzprisma + ein 60°-CaF_2-Prisma, 5×5 cm². Das letztere wäre auch entbehrlich gewesen.) Bestrahlungszeit etwa 3 bis 5 min.

Zum Vergleich mit den ersten seinerzeit auf besondere Weise durch Eigenabsorption photographierten Naphthalinspektren[1]) wurden einerseits Aufnahmen mit Ölschichten hergestellt, andererseits wurde das Naphthalinspektrum auch noch in der üblichen Weise mit einem Mikroradiometer grob ausgemessen. Für beide Zwecke wurden aus der erstarrten Oberfläche einer Naphthalinschmelze klare Naphthalinplättchen von verschiedener Dicke (0,1 bis 3 mm) herausgeschnitten und vor dem Eintrittsspalt des Prismenspektrometers angebracht. Bei den Messungen mit dem Mikro-

2,5 3 3,5 μ

Fig. 7.
Die Rotationsschwingungsbande von HCl-Gas bei 3,46 μ, ferner einige CO_2- und H_2O-Banden.

3,4 3,5 3,6 μ

Fig. 8. Die HCl-Bande allein.

radiometer wurde ein CaF_2-Prisma von 54° brechendem Winkel und 4×5 cm² Seitenlänge benutzt. Die Spalte und Naphthalinplättchen hatten folgende Abmessungen:

λ in μ:	1—2,5	2,5—5	5—7	7—9
Spaltbreite mm	0,05	0,2	0,6	1
Plattendicke mm . . .	3 und 0,5		0,2	0,1

Die Messungen sind in den Kurven der Fig. 9 dargestellt und zeigen gute Übereinstimmung mit den Spektralaufnahmen Fig. 11 und 12.

Fig. 10 zeigt zunächst das Grundspektrum des Nernstbrenners mit den Absorptionsstellen von CO_2 und H_2O. (Eine Absorption der Öldämpfe in der Kammer wurde nicht beobachtet.) Bei dieser Aufnahme erscheint die CO_2-Bande bei 4,27 μ hell auf dunklem Grunde, während sich die andere Absorptionsstelle bei 2,6 μ dunkel auf hellem Grunde abhebt. Als Ursache erkennt man deutlich die übermäßig starke Verdampfung der Ölschicht

[1]) M. Czerny, l. c.

im kurzwelligen Gebiet, etwa bis 3 μ. Die Spaltbreite betrug etwa 0,2 mm, die Bestrahlungszeit etliche Sekunden.

Fig. 11 zeigt nun die Absorption eines sehr dünnen Naphthalinplättchens ($\sim$ 0,1 mm) (Spaltbreite und Bestrahlungszeit wie bei Fig. 10). Es erscheinen also außer den Absorptionsstellen des Grundspektrums nur die stärksten Absorptionen des Naphthalins: Bei 3,3 μ, zwischen 5 und 6 μ und

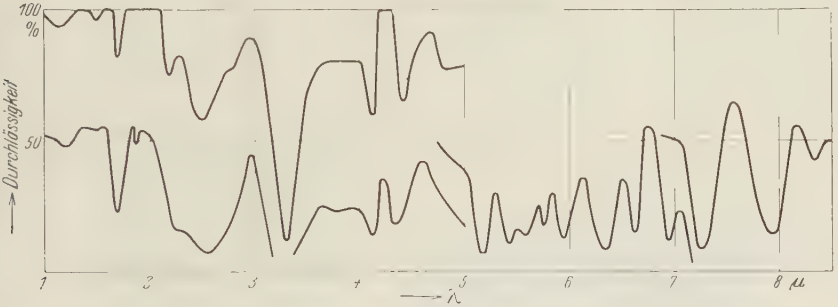


Fig. 9.
Durchlässigkeitskurven von Naphthalin, gemessen mit dem Mikroradiometer.

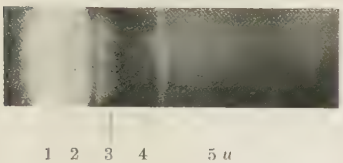


Fig. 10.
Hauptabsorptionsstellen der Zimmerluft. Bestrahlung etliche Sekunden.

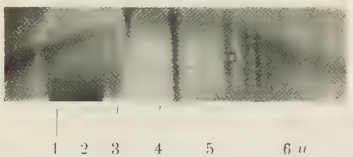


Fig. 11.
Absorptionsspektrum des Naphthalins zwischen 2 und 6,5 μ. Bestrahlung etliche Sekunden.

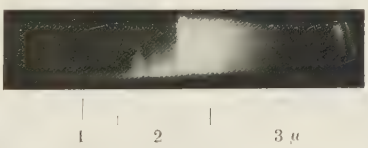


Fig. 12.
Absorptionsspektrum des Naphthalins zwischen 1,5 und 3 μ: nach $\sim$ 1 min.

bei 6,3 μ. Als Ergänzung dazu gibt Fig. 12 bei größerer Dispersion (60°-Quarzprisma) und etwas engerem Spalt ($\sim$ 0,15 mm) die kurzwelligeren schwächeren Naphthalinabsorptionen von 1,7 bis etwa 2,8 μ mit dickerer Platte (0,5 mm). Bestrahlungszeit etwa 1 Minute. Alle diese Spektrogramme zeigen sehr anschaulich die überragende Intensität in der Gegend von 1,5 μ. Dort ist die Schicht immer bereits völlig verdampft, wenn die langwelligeren Teile des Spektrums eben erst erscheinen.

Der Fortfall des zweiten Spektrometerspaltes beim photographischen Verfahren bedeutet unter sonst gleichen Verhältnissen einen Vorteil, da ja der zweite Spalt durch seine endliche Breite auch einen Teil zur Nivellierung der Meßkurve beiträgt. Erst bei Spaltbreiten, die geringer sind als $\sim {}^1/_{10}$ mm, wird dieser Vorteil des photographischen Verfahrens kompensiert durch die oben besprochene Verteilung der Wärme in der Rußschicht.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit der Ultrarotphotographie außer zur Spektrographie ist die Abbildung von Temperaturstrahlern mit Hilfe ihrer Eigenstrahlung. Im Prinzip kann von jedem strahlungsfähigen Körper eine Ultrarotphotographie hergestellt werden, sobald seine Temperatur T_1

Fig. 13.
Ultrarotphotographie einer Anode mit Hilfe ihrer ultraroten Eigenstrahlung. Bestrahlungszeit wenige Sekunden.

Fig. 14.
Gewöhnliche Photographie der benutzten Anode; Maßstab 1 : 1.

höher oder niedriger ist als die Zimmertemperatur T_0. Mit Hilfe des Stefan-Boltzmannschen Gesetzes ermittelt man dann bei gegebenen Temperaturwerten leicht die Bestrahlungszeit τ, die erforderlich ist, um einen starken Farbkontrast, also ein deutliches Bild des Gegenstandes hervorzubringen.

Bei Verlustfreiheit, vollständiger Schwärze von Strahler und Membran und einem Öffnungsverhältnis (Hohlspiegeldurchmesser d : Bildweite b) von beispielsweise 1 : 6 benötigt man dann zu einer weitgehenden Umstimmung der Interferenzfarben etwa folgende Bestrahlungszeiten τ:

T_1 in °C	— 273	0	+ 10	16	20	60	100
τ in min	0,1	0,5	1,3	7	2,5	0,13	0,05

(Zimmer- und Membrantemperatur $T_0 = 17°$ C.)

Im allgemeinen dürften die Verluste bei leidlich schwarzen Strahlern kaum wesentlich größer sein als etwa 50%. Die Belichtungszeiten sind also

dann recht kurz und lassen eine gute Verwendbarkeit der Ultrarotphotographie für viele wärmetechnische Untersuchungen erhoffen: z. B. um die Temperaturverteilung schwer zugänglicher Gegenstände festzustellen, bei denen ein punktweises Abtasten mit Thermospitzen zu umständlich oder unmöglich ist. Fig. 13 zeigt als Beispiel die Ultrarotphotographie einer stark belasteten [4 Watt[1])] Anode einer Gleichrichterröhre (Telefunken RGN 1503). Die Bestrahlungszeit betrug nur wenige Sekunden, obgleich das Anodenblech eine blanke Oberfläche, also bestimmt sehr geringes Emissionsvermögen hatte. Die benutzte Membran zeigt einige störende Falten und die Ölschicht eine schon etwas fleckige Oberfläche, so daß die vorliegende Abbildung noch nicht genügen würde, um ein ausreichendes Bild von der Temperatur*verteilung* auf dem Anodenblech zu

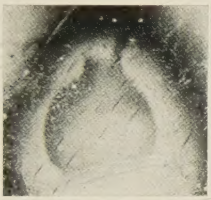


Fig. 15.
Geschwärzter Glaskolben mit Wasserfüllung von 90° C, aufgenommen mit Hilfe seiner ultraroten Eigenstrahlung. (Exp. ∼ 30 sec).

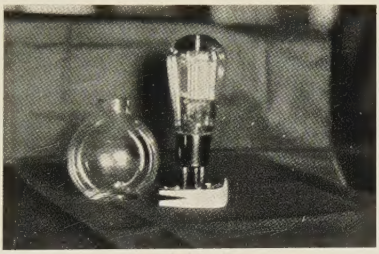


Fig. 16.
Die zu Fig. 2, 13, 14, 15 benutzten Gegenstände.

geben. Aber hierzu ist lediglich die Aufnahmetechnik zu verbessern. Die hinter dem Anodenblech oben und unten hervorragenden Enden der drei Heizfäden erscheinen bereits unnatürlich verbreitert, da sie am stärksten strahlten. Diese Stellen sind also „überbelichtet". Dabei waren die Fäden unterheizt (2,0 statt 2,5 Volt normal) und zeigten sichtbare Glut nur in den mittleren Teilen, die von dem Anodenblech vollständig verdeckt sind.

Ferner ist deutlich zu sehen, daß die an sich sehr schwache Strahlung blanker Metalloberflächen in Abweichung vom Lambertschen cos-Gesetz bei streifender Emission noch am stärksten ist: Die schrägen Schmalwände des Anodenmantels (von denen die Seitenflügel abgehen) strahlten am stärksten.

Fig. 15 zeigt einen Strahler von etwa 90° C, einen geschwärzten Glaskolben, in dem sich heißes Wasser befindet. Benutzte Optik: $b : d = 6 : 1$;

[1]) Selbst bei einer Anodenbelastung von nur 0,5 Watt wurde schon nach einigen Minuten ein (allerdings sehr unvollkommenes) Abbild erhalten.

Bestrahlungszeit $\sim {}^1/_2$ Minute (berechnet: $\sim$ 4,5 sec). Der Grund für den geringen Nutzeffekt liegt hauptsächlich in der sehr unvollkommenen Schwärze von Strahler *und* Absorber; ferner waren die Verluste am Spiegel beträchtlich. Fig. 14 und 16 zeigen die zu den Aufnahmen 2, 13 und 15 benutzten Gegenstände.

Die Expositionszeiten werden zurzeit hauptsächlich beschränkt durch die Unreinheit der verdampfenden Substanzen und die kleinen Unebenheiten der Zaponlackmembranen, wie oben erwähnt.

Aber nach Überwindung dieser mehr technischen Schwierigkeiten dürften sich bei der erreichten Zeichenschärfe und Empfindlichkeit mit diesem photographischen Verfahren schon bei mäßigen Expositionszeiten Spektrogramme von erheblich größerer Auflösung herstellen lassen, als es mit den gebräuchlichen Strahlungsmeßinstrumenten möglich ist. Denn letztere werden meist schon bis an die Grenze der Brownschen Molekularbewegung ausgenutzt. Gerade darin liegt aber ein sehr wesentlicher Vorteil des photographischen Verfahrens, daß es über derartige Schwankungen hinwegintegriert und die Strahlungswirkungen zeitlich akkumuliert[1]). Auch die Intensitätsschwankungen der Strahlungsquellen bedeuten hier keine Störung mehr.

Herrn Prof. Dr. M. Czerny, der die Anregung zu dieser Arbeit gegeben hat, bin ich für die vielen wertvollen Hinweise und für das große Interesse an dem Fortschreiten der Untersuchung sehr zu Dank verpflichtet. Herrn Geheimrat Prof. Dr. Nernst danke ich für die Überlassung der Institutsmittel zur Durchführung der Arbeiten. Herrn Privatdozent Dr. H. Fischer vom Chemischen Institut der Universität Berlin danke ich für die liebenswürdige Beratung und Unterstützung bei der Auswahl organischer Substanzen.

Berlin, Physikalisches Institut der Universität, Reichstagsufer 7—8.

[1]) Und zwar theoretisch über beliebig lange Zeiten, während die anderen Instrumente das nur in unvollkommener Weise bis zur Erreichung des Endausschlages tun können (vgl. hierüber eine demnächst erscheinende Veröffentlichung von M. Czerny).

Lebenslauf.

Am 25. April 1907 wurde ich, Hermann Willenberg, zu Berlin-Schöneberg geboren. Die Reifeprüfung legte ich Ostern 1925 am Realgymnasium zu Berlin-Lichterfelde ab. Nach halbjähriger praktischer Tätigkeit studierte ich an der Technischen Hochschule und Universität Berlin in der Hauptsache Mathematik und Physik.

Die vorliegende Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Berliner Universität ausgeführt.